

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.013

基于 ANSYS Workbench 的磁力泵磁性联轴器 的多目标优化设计

张 勇, 何朝辉, 郭 嘉

(浙江省机电设计研究院有限公司 水泵所, 浙江 杭州 310051)

摘要:针对磁力泵磁性联轴器单一目标优化设计无法满足设计要求的问题,在 ANSYS Workbench 平台上利用 DesignXplorer 优化设计模块与 Ansoft Maxwell 14.0 三维有限元分模块对磁性联轴器进行了多目标优化设计。通过半经验半理论设计得到了磁性联轴器设计参数作为初始参考设计参数,采用中心组合试验设计(central composite design, CCD)方法与 NSGA-II 优化算法相结合的方法,得到了性价比最优的磁性联轴器设计参数。研究表明,优化目标 $T_{\max}/V$ 指标比初始参数提高 7% 左右, P_w 指标降低约 9%,通过对磁性联轴器多目标优化设计降低了生产成本及能耗,满足设计要求。

关键词:磁性联轴器;数值模拟;试验设计方法;多目标优化设计

中图分类号:TH133.4;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0487-04

Muti-object optimization of magnetic coupling of magnetic driving pump based on ANSYS Workbench

ZHANG Yong, HE Chao-hui, GUO Jia

(Institute of Pump, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the single goal optimization design could not meet the design requirements of magnetic coupling of magnetic driving pump, Design Xplorer optimization design module and Ansoft Maxwell 14.0 finite element analysis module on ANSYS Workbench were used by multi-objective optimization design of magnetic coupling of magnetic driving pump. The initial reference design parameters were obtained by method of semi-theoretical and semi-empirical. The cost-effective parameters of magnetic coupling were obtained based on central composite design method and optimization algorithm NSGA-II. The results show that the optimized target index $T_{\max}/v$ is about 7 % higher than that of the initial parameters, and the P_w is about 9 % less than that of the initial parameters. The simulation results indicate that the optimized parameters can reduce production cost and energy consumption of magnetic coupling and meet design requirement.

Key words: magnetic coupling; numerical simulations; design of experiments method; multi-object optimization design

0 引 言

现今工业生产对能源节约、环境保护越来越重视。磁力泵具有无密封、无泄漏、无污染等特点,在国民生产各个领域对其需求越来越大。磁力联轴器

是磁力泵的核心部件,磁力泵的性能和成本很大程度上受到磁性联轴器结构参数的影响。因此对提高磁力泵的可靠性及效率,降低磁力泵的生产成本具有重要的价值。

近 20 年来,国内外院校及企业已对磁性联轴器及磁力传动的特性和与之配套的金属隔离套的磁涡流损

失特性等做了大量的研究,对于磁力联轴器的优化设计方法也作了大量研究。冯忠明等^[1]对磁性联轴器隔离套的磁涡流损失提出了计算公式并对其进行了应用。李金蔚^[2]对磁力泵各项损失进行了分析,并提出减小磁力泵磁涡流损失的有效途径和方法。孔繁余等^[3-4]对磁性联轴器进行简化,利用 ANSYS 软件,对二维磁性联轴器进行数值模拟,得到磁场分布图和磁转矩值,并分析了在不同磁转角下,不同气隙厚度、轭铁厚度、永磁体厚度、磁钢材料、磁钢对数的转矩值。W. Wu 等^[5]用有限元分析软件 ANSYS 对磁性联轴器三维模型进行分析,进而优化设计,并且讨论了最优设计方案的步骤。Lui Pinkuan 等^[6]在研究用于真空机器人中的内外轴式磁性联轴器时提出了一种引入正交试验法与小范围穷举法相结合的优化设计方法。这种设计方法在较小步长,较多水平数的情况下非常适用。王禹林等^[7-8]对计算磁块间隙排列的组合推拉式磁性联轴器传动转矩的 3 种方法(改进后的等效磁荷法、片电流法、三维有限元法)从求解效率和求解精度两个方面进行了比较,并提出了一种正交试验法与标准的最优值搜索技术相结合的实用的优化设计方案。

磁性联轴器各设计参数对其各个性能指标都存在影响,且各参数对磁性联轴器各个性能指标影响作用不同,因此磁性联轴器并不适用单一参数单一目标优化,所以进行磁性联轴器的多目标优化设计,对各项优化指标折衷与平衡。

本研究将提出磁力联轴器多目标优化函数,并运用试验设计法与改进的遗传算法相结合的优化设计方法,对磁性联轴器进行多目标优化设计。

1 研究模型

1.1 物理模型

本研究将径向式紧密排列的组合推拉磁性联轴器作为研究对象,二维物理模型示意图如图 1 所示。

1.2 数学模型

传统经验公式及二维数值模拟对于端部漏磁所产生的损失考虑不够,设计的磁性联轴器可能因为端部效应而达不到所传递的扭矩^[9],同时为了获得更高精度的求解结果及方便参数化建模,采用三维模拟更接近磁性联轴器的实际特性。在三维模型中,所模拟的

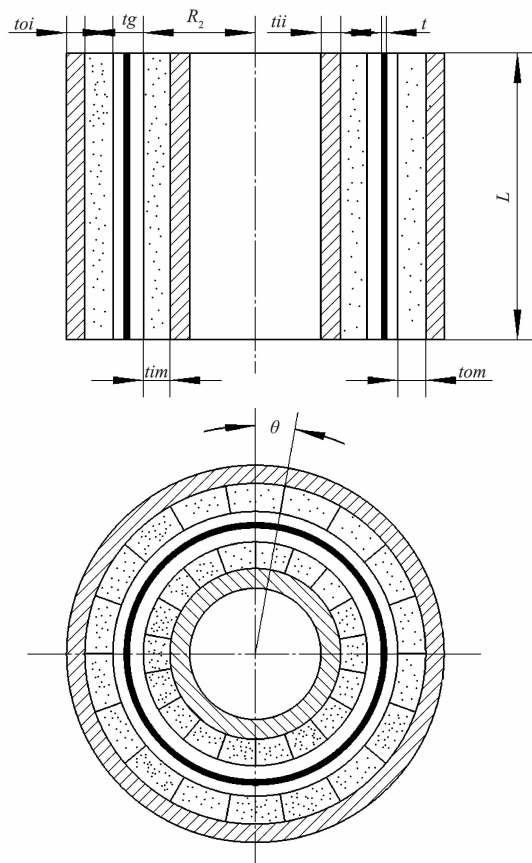


图 1 二维物理模型示意图

tim —内转子磁钢厚度; tom —外转子磁钢厚度; m —磁极数目; tii —内转子轭铁厚度; L —磁钢轴向长度; toi —外转子轭铁厚度; R_2 —内转子半径; t —隔离套厚度; tg —气隙

区域中没有传导电流,而且积分路径内没有电流链环,所以可以用标势法求解磁边界值问题。对于 Maxwell 方程组的磁场能方程:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + j_0$$

满足条件: $\partial E / \partial t = 0$ 和 $j_0 = 0$ 。

所以 Maxwell 方程组可以描述为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot H = 0 \end{cases} \quad (2)$$

因为梯度的旋度为零,引入磁标势 $\Phi_M, H = -\nabla \Phi_M$ 。

由 $\nabla \cdot B = 0$, 有:

$$\nabla \cdot [\mu_0 (H + M)] = 0 \quad \nabla \cdot H = -\nabla \cdot M \quad (3)$$

令 $\rho_m = -\nabla \cdot M$, 对照静电场散度方程, ρ_m 是等效磁荷,称 ρ_m 为磁荷体密度,这样可得:

$$\nabla \cdot H = \rho_m \quad (4)$$

将磁势能 Φ_M 代入得到:

$$\nabla^2 \Phi_M = -\rho_m \quad (5)$$

只要按照给定的边界条件求解该方程,得到磁标势 Φ_M ,从而得到空间的磁场分布 $H = -\nabla\Phi_M$ 和磁通密度 $B = \mu H$ 。

2 优化设计

2.1 多目标优化数学模型

磁性联轴器的优化目标是:单位磁钢体积的最大磁转矩最大($T_{\max}/V$)及涡流损失功率最小(P_w/V),优化数学模型如下:

$$\begin{cases} \max T/V = f(x) = torque[R_0, t_m, t_i, t_g, L]/V \\ \min P_w/V = f(x) = Power[R_0, t_m, t_i, t_g, L, t]/V \\ x = [R_0, t_m, t_i, t_g, L, t] \\ t < t_g \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V = 2\pi L t m(2R_0 + 2t_i + 2t_m + t_g)$, $T = torque[R_0, t_m, t_i, t_g, L]$, $R_0 = R_2 - t_i - t_m$ 。

磁性联轴器初始磁钢几何参数及材料属性如表 1 所示。

表 1 磁性联轴器磁钢几何参数表		
功率/kW	磁性联轴器磁钢 尺寸参数/mm	磁钢材料属性(NdFeB)
55	$R_0 = 63.5, t_m = 6,$	剩余磁感应强度 $Br = 1.17\ T$ 相对磁导率 $\mu_r = 1.06$ 矫顽力 $H_c = 844\ 000\ A/m$ 隔离套材料 1Cr18Ni9Ti
	$t_i = 6, t_g = 5.5,$	
	$L = 108, t = 3$	

注:上表磁极数 $m = 24$

2.2 优化设计方案

磁设计参数是:通过假设内外转子轭铁厚度、磁钢厚度相等、磁极对数一定、磁极数相等,选择内转子轴半径 R_0 ($R_0 = R_2 - t_i - t_m$)、磁钢轴向长度 L 、轭铁厚度 t_i 、磁钢厚度 t_m 、气隙厚度 t_g 、隔离套厚度 t 参数。确定各参数的约束条件即参数上下限,作为每个参数的水平即取 3 个水平,因素水平表如表 2 所示。

表 2 因素水平表						
水平	因 素					
	R_0/mm	L/mm	t_i/mm	t_m/mm	t_g/mm	t/mm
1	73.5	118	9	9	6.5	4
2	63.5	108	6	6	5.5	3
3	83.5	128	12	12	7.5	5

本研究根据中心组合试验法原则选取不同因素水平进行计算,得到的中心组合试验设计方案如表 3 所示。

表 3 中心组合试验设计方案

试验号	R_0/mm	L/mm	t_i/mm	t_m/mm	t_g/mm	t/mm
1	73.5	118	9	9	6.5	4
2	73.5	108	6	6	5.5	3
3	73.5	128	12	12	7.5	5
4	63.5	118	9	9	5.5	5
5	63.5	108	6	12	7.5	4
6	63.5	128	12	6	6.5	3
7	83.5	108	9	9	7.5	3
8	83.5	128	6	6	6.5	5
9	83.5	118	12	12	5.5	4
10	73.5	128	9	12	5.5	3
11	73.5	118	6	9	7.5	5
12	73.5	108	12	6	6.5	4
13	63.5	108	9	12	6.5	5
14	63.5	128	6	9	5.5	4
15	63.5	118	12	6	7.5	3
16	83.5	128	9	6	7.5	4
17	83.5	118	6	12	6.5	3
18	83.5	108	12	9	5.5	5

2.3 优化过程

本研究将磁力联轴器各个尺寸用 R_0 、 L 、 t_i 、 t_m 、 t_g 、 t 参数进行三维参数化建模。在 Design Xplorer 的试验设计(DOE)模块将中心组合方案数据导入,设定优化方法为多目标遗传算法(MOGA)。

优化分析流程如图 2 所示。

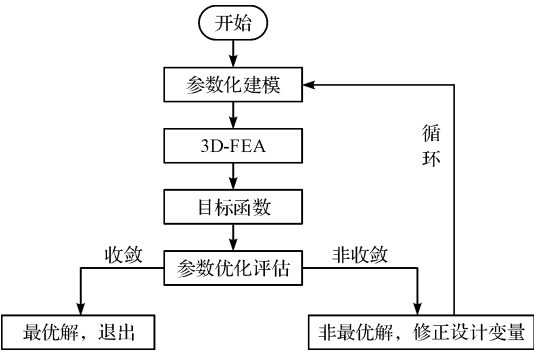


图 2 优化流程图

3 结果分析

中心组合方案仿真试验结果如表 4 所示。本研究将优化计算得出的两组优化推荐值与初始值比较,结果如表 5 所示。这几组优化模型的综合性能都比初始参数组有了较大的提高,提高了材料的利用率,降低了生产成本及能耗。

表 4 试验方案仿真试验结果

试验号	$T_{max}/N \cdot m$	V/m^3	P_w/W	T_{max}/V
1	205.477 6	9.48×10^{-4}	21 824	216 665. 1
2	141.514 9	5.39×10^{-4}	10 563	262 567. 3
3	262.420 9	1.466×10^{-3}	37 654	179 036. 0
4	180.004 8	8.43×10^{-4}	22 221	213 460. 7
5	139.475 6	1.041×10^{-3}	13 363	133 945. 2
6	136.055 0	6.13×10^{-4}	9 515	221 789. 9
7	209.745 5	9.64×10^{-4}	18 078	217 536. 7
8	183.915 4	7.15×10^{-4}	26 857	257 304. 9
9	366.793 5	1.471×10^{-3}	45 048	249 291. 8
10	302.901 8	1.408×10^{-3}	24 509	215 153. 9
11	169.702 9	9.23×10^{-4}	22 578	183 792. 0
12	142.509 0	5.79×10^{-4}	15 510	246 272. 7
13	173.123 1	1.072×10^{-3}	22 111	161 521. 8
14	179.841 4	8.82×10^{-4}	16 597	203 864. 7
15	109.909 2	5.69×10^{-4}	7 666	193 212. 2
16	174.726 8	7.4×10^{-4}	20 242	236 082. 2
17	292.639 5	1.398×10^{-3}	25 080	209 336. 0
18	272.910 3	9.83×10^{-4}	42.667	277 769. 5

表 5 初始值与优化值

Candidate points	R_0/mm	L/mm	t_i/mm	t_m/mm	t_g/mm	t/mm	P_w/W	T_{max}/V
Initial	63.5	108	6	6	5.5	3	10 553	269 849. 2
A	64.27	107.80	6.30	6.07	5.68	3.05	9 581	289 121. 1
B	64.26	110.67	6.14	6.05	5.53	3.14	9 682	289 056. 4

4 小结

本研究通过提出了磁性联轴器多目标优化设计数学模型,同时在 ANSYS Workbench 平台上利用 Design-Explorer 结合 Ansoft Maxwell 14.0 的三维有限元分析。将响应面法和有限元仿真相结合,采用 NSGA-II 优化算法进行优化使得磁性联轴器各参数达到合理的配置,从而达到磁性联轴器性价比最优的目的。

比对结果表明,优化目标 T_{max}/V 指标比初始参数提高 7% 左右, P_w 指标降低约 9%,通过对磁性联轴器磁性联轴器多目标优化设计降低了生产成本及能耗,满足设计要求。

参考文献 (References) :

[1] 冯忠明,陈存东. 磁力泵涡流损失的计算分析与应用[J]. 通用机械,2005(4):81-83.
[2] 李金蔚. 磁力驱动离心泵能量损失分析[J]. 流体机械, 2009,37(12):39-42.

[3] 孔繁余,王志强,张旭锋,等. 磁性联轴器的转矩数值分析及优化设计[J]. 机械设计与制造,2009(11):7-9.
[4] 孔繁余,陈刚,曹卫东,等. 磁力泵磁性联轴器的磁场数值计算[J]. 机械工程学报,2006,42(11):213-218.
[5] WU W, LOVATT H C, DUNLOP J B. Analysis and design optimization of magnetic couplings using 3D finite element modeling[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1997,33(5):4083-4085.
[6] Pin kuan LIU, Yu lin WANG, Jun WU. Novel design and analysis of magnetic couplings used for vacuum robot[C]. 2008 International Conference on Intelligent Robotics and Applications, New York:IEEE,2008.
[7] 王禹林,刘品宽,丁汉. 内外轴式磁性联轴器的优化设计[J]. 光学精密工程,2008,16(11):2244-2251.
[8] 杨立东,徐晓波,乔环,等. 基于 MSC. Patran 的弹性膜片联轴器的有限元分析[J]. 机械,2015,42(S1):46-48,71.
[9] 孔繁余,冯子政,柏宇星,等. 磁力泵磁性联轴器的三维模拟计算与分析[J]. 机械设计与制造,2014(10):36-39.

[编辑:李辉]

本文引用格式: